



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 44 00 980 A 1

⑤1 Int. Cl. 5:
H 03 H 9/25

⑳ Aktenzeichen: P 44 00 980.1
㉔ Anmeldetag: 14. 1. 94
㉕ Offenlegungstag: 21. 7. 94

Aum

DE 44 00 980 A 1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1

14.01.93 JP P 4815/93 31.08.93 JP P 216313/93
29.11.93 JP P 298000/93

㉑ Anmelder:

Murata Mfg. Co., Ltd., Nagaokakyo, Kyoto, JP

㉒ Vertreter:

ter Meer, N., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Müller, F.,
Dipl.-Ing., 81679 München; Steinmeister, H.,
Dipl.-Ing.; Wiebusch, M., 33617 Bielefeld; Urner, P.,
Dipl.-Phys. Ing.(grad.); Merkle, G., Dipl.-Ing. (FH),
Pat.-Anwälte, 81679 München

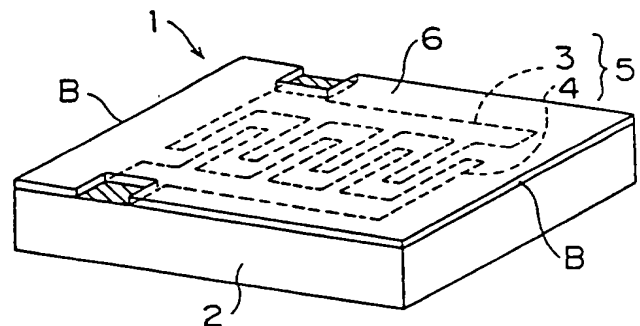
㉓ Erfinder:

Kadota, Michio, Nagaokakyo, Kyoto, JP; Mizoguchi,
Naoki, Nagaokakyo, Kyoto, JP

⑤4 Oberflächenwellenbauelement

⑤7 Oberflächenwellenbauelement, das mit Love-Wellen arbeitet mit:

- einem Substrat (2) aus einem piezoelektrischen Einkristall und
- wenigstens einem Interdigitalwandler (5), der auf dem Substrat (2) ausgebildet, dadurch gekennzeichnet,
- daß auf dem Substrat ein dünner piezoelektrischer Film (6) aus einem Material aufgebracht ist, in dem die Aufbereitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen kleiner ist als in dem piezoelektrischen Einkristall-Substrat (2), und daß das Verhältnis H/λ der Dicke H des Films (6) zur Wellenlänge λ der erregten Love-Wellen im Bereich von 0,01 bis 0,2 liegt.



DE 44 00 980 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Oberflächenwellenbauelement, das mit Love-Wellen arbeitet, insbesondere ein Oberflächenwellenbauelement mit einem Dreischicht-Aufbau, der durch einen dünnen piezoelektrischen Film aus ZnO , Ta_2O_5 oder dergleichen, Elektroden und ein piezoelektrisches einkristallines Substrat gebildet wird.

Geräte wie beispielsweise ein tragbares VHF- oder UHF-Radiokommunikationsgerät sollten möglichst kleine Abmessungen, ein geringes Gewicht und einen niedrigen Leistungsverbrauch aufweisen. Insbesondere sollte ein lokaler Oszillator, der in einem solchen tragbaren Radiokommunikationsgerät zur Kanalwahl verwendet wird, eine große Bandbreite besitzen, um Vielkanalkommunikation zu ermöglichen. Somit muß ein spannungsgesteuerter Oszillator (VCO) der ein wesentlicher Bestandteil des lokalen Oszillators ist, ebenfalls eine hohe Bandbreite aufweisen, und dies bei kleinen Abmessungen, geringem Gewicht und geringer Leistungsaufnahme.

Im allgemeinen wird hierzu ein mit Rayleigh-Wellen arbeitender Oberflächenwellen-Resonator als eine Einrichtung eingesetzt, die akustische Oberflächenwellen verwendet. Bei einem solchen Oberflächenwellen-Resonator, der mit Rayleigh-Wellen arbeitet, ist es jedoch wegen seines kleinen elektromechanischen Kopplungsfaktors K schwierig, eine große Bandbreite zu erzielen. Aus diesem Grund ist als Einrichtung mit einem großen elektromechanischen Kopplungsfaktor K , die eine hohe Bandbreite erreichen kann, ein Oberflächenwellen-Resonator auf Interesse gestoßen, der mit Love-Wellen arbeitet.

Ein herkömmlicher Oberflächenwellen-Resonator, der mit Love-Wellen arbeitet, weist ein Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO_3 -Substrat und einen Doppelkamm-Wandler oder Interdigitalwandler (im folgenden als ITD bezeichnet) auf, der aus einem dünnen Film aus Au, Ag oder Pt besteht, der auf dem Substrat ausgebildet ist. Der ITD wird durch zwei Kammelektroden mit mehreren ineinandergreifenden Elektrodenfingern gebildet. Bei diesem Aufbau bestehen die Elektroden, die auf dem Substrat ausgebildet sind, aus einem Metall, das eine kleinere Schallgeschwindigkeit aufweist als das LiNbO_3 Substrat, so daß durch einen solchen zweischichtigen Aufbau Love-Wellen angeregt werden. Die Elektroden, die eine kleinere Schallgeschwindigkeit aufweisen müssen als das Substrat, bestehen aus einem Material wie etwa Au, Ag oder Pt, wie oben beschrieben wurde.

Wenn beispielsweise ein solcher Oberflächenwellen-Resonator durch Au-Elektroden und/oder ein Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO_3 -Substrat gebildet wird (die Oberflächenwellen breiten sich längs der X-Achse aus, und der Kristall ist im wesentlichen längs der Y-Achse geschnitten), hat sein elektromechanischer Kopplungsfaktor K einen großen Wert von etwa 58%, so daß eine hohe Bandbreite erzielt wird.

In diesem Fall ergeben sich jedoch hohe Kosten für den Oberflächenwellen-Resonator, da Metalle wie Au, Ag oder Pt sehr teuer sind.

Bei dem herkömmlichen, mit Love-Wellen arbeitenden Oberflächenwellen-Resonator, der den zweischichtigen Aufbau mit Elektroden auf einem LiNbO_3 -Substrat aufweist, ist es außerdem schwierig, ein Bauelement mit einer niedrigen Frequenz zu schaffen, wie nachfolgend erläutert wird. Wenn beispielsweise die Metallelektroden aus Au bestehen und das Substrat durch ein Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO_3 -Substrat gebildet wird, so werden keine Love-Wellen angeregt, sofern das Verhältnis $H(\text{Au})/\lambda$ nicht wenigstens 0,025 beträgt, wobei $H(\text{Au})$ die Dicke jeder Elektrode ist und λ die Wellenlänge der erregten Love-Wellen ist. Aus diesem Grund muß bei kleiner Frequenz die Dicke der Elektroden so weit erhöht werden, so gilt $H/\lambda = 0,025$. In diesem Fall ist es jedoch aufgrund von Seitenätzung und Eindringen der Ätzlösung in Zwischenräume zwischen Resist-Schichten und den Elektroden nicht möglich, die Elektrodenfinger mit den gewünschten Breiten herzustellen und ein Oberflächenwellenbauelement mit der gewünschten Charakteristik zu erhalten.

Bei dem herkömmlichen Love-Wellenbauelement mit Au-Elektroden ist außerdem die Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz relativ groß so daß seine Charakteristik auch in relativ großem Ausmaß durch Temperaturänderungen beeinflusst wird.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein mit Love-Wellen arbeitendes Oberflächenwellenbauelement zu schaffen, das mit kostengünstigem Elektrodenmaterial hergestellt und ohne Vergrößerung der Elektrodendicke bei niedriger Frequenz eingesetzt werden kann und daß außerdem eine geringe Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz aufweist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein mit Love-Wellen arbeitendes Oberflächenwellenbauelement, das ein piezoelektrisches Substrat, wenigstens einen auf dem piezoelektrischen Substrat ausgebildeten IDT und einen dünnen piezoelektrischen Film aufweist, der so auf dem piezoelektrischen Substrat ausgebildet ist, daß er den IDT überdeckt, und der aus einem Material besteht, für das die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen kleiner ist als für das Material des piezoelektrischen Substrats. In diesem Bauelement liegt das Verhältnis H/λ zwischen der Dicke H des piezoelektrischen Films und der Wellenlänge λ der erregten Love-Wellen im Bereich von 0,01 bis 0,2.

Bei dem piezoelektrischen Substrat handelt es sich beispielsweise um ein LiNbO_3 -Substrat, vorzugsweise ein um 0 bis 30 gedrehtes Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO_3 -Substrat oder ein LiTaO_3 -Substrat, vorzugsweise ein um 36° gedrehtes Y-Schnitt LiTaO_3 -Substrat (die Winkelangaben beziehen sich auf den Winkel zwischen der Schnittfläche und der Y-Achse).

Die Erfinder haben festgestellt, daß es möglich ist, Love-Wellen anzuregen, ohne daß strikte Begrenzungen hinsichtlich der Dicke der Elektroden und der Masse des Elektrodenmaterials eingehalten werden müssen, wenn eine Dreischichtstruktur verwendet wird, die man erhält, indem man Elektroden auf einem LiNbO_3 -Substrat oder einem LiTaO_3 -Substrat ausbildet und außerdem auf den Elektroden einen dünnen piezoelektrischen Film bildet, für den die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen kleiner ist als bei dem piezoelektrischen Substrat.

Erfindungsgemäß ist wenigstens ein IDT auf dem vorgenannten piezoelektrischen Substrat ausgebildet, und der erwähnte dünne Film überdeckt den IDT. Das Verhältnis H/λ liegt im Bereich von 0,01 bis 0,2, so daß es möglich ist, Love-Wellen zu erregen und einen ausreichend hohen elektromechanischen Kopplungsfaktor selbst

dann zu erreichen, wenn die Dicke der Elektroden variiert (verringert) wird.

Das erwähnte Verhältnis H/λ liegt im Bereich von 0,01 bis 0,2, da keine Love-Wellen angeregt werden können, wenn das Verhältnis kleiner ist als 0,01, während der elektromechanische Kopplungsfaktor so klein wird, daß sich keine hohe Bandbreite erreichen läßt, wenn das Verhältnis größer wird als 0,2.

Der dünne piezoelektrische Film besteht beispielsweise aus ZnO , CdS oder Ta_2O_5 .

Wenn das piezoelektrische Substrat aus 36° gedrehtem Y-Schnitt LiTaO_3 besteht, liegt das Verhältnis H/X vorzugsweise im Bereich von 0,01 bis 0,13. Andererseits liegt dieses Verhältnis H/λ vorzugsweise im Bereich von 0,02 bis 0,13 wenn der dünne Film aus ZnO besteht, während das Verhältnis vorzugsweise im Bereich 0,01 bis 0,10 liegt, wenn der dünne Film aus CdS besteht.

Wenn das piezoelektrische Substrat aus um 0 bis 30° gedrehtem Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO_3 besteht, liegt das Verhältnis H/λ vorzugsweise im Bereich von 0,05 bis 0,2.

Durch die Erfindung wird ein elektromechanischer Kopplungsfaktor K von wenigstens 40% erreicht, so daß es möglich ist, einen Oberflächenwellen-Resonator oder dergleichen mit großer Bandbreite zu erhalten. Außerdem ist es möglich, die Resonanzfrequenz zu variieren, indem man das Verhältnis H/λ variiert, während die Dicke der Elektroden konstant gehalten wird. Somit ist es möglich, einen Oberflächenwellen-Resonator mit einer niedrigen Resonanzfrequenz zu schaffen, was bei herkömmlichen Love-Wellen-Resonatoren mit zweischichtigem Aufbau aus Au-Elektroden und Y-Schnitt X-Ausbreitungs- LiNbO_3 als Substrat kaum möglich war.

Bei dem erfindungsgemäßen Oberflächenwellenbauelement ist außerdem die Temperaturabhängigkeit der Frequenzcharakteristik im Vergleich zu herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonatoren mit Love-Wellen verringert, so daß auch ein Bauelement mit größerer Temperaturstabilität geschaffen werden kann.

Durch die Erfindung ist es somit möglich, ein Bauelement zu schaffen, das sowohl hinsichtlich der Temperaturcharakteristik als auch hinsichtlich seiner elektrischen Eigenschaften, insbesondere der Resonanz, hervorragende Eigenschaften aufweist.

Vorzugsweise sind der IDT und der dünne Film auf einer Plus-Oberfläche eines einkristallinen piezoelektrischen Substrats ausgebildet, wodurch ein größerer elektromechanischer Kopplungsfaktor K erreicht werden kann. Der Ausdruck "Plus-Oberfläche des Substrats" bezeichnet eine Hauptfläche des Substrats, die bei Ausübung einer mechanischen Spannung auf das Substrat eine positive elektrische Ladung erhält. Die Erfinder haben die Unterschiede in den Ausbreitungseigenschaften von Oberflächenwellen untersucht, die durch die Polarität des Substrats bei einem Dreischicht-Aufbau mit einem LiNbO_3 -Substrat, einem IDT und dem erwähnten dünnen Film auf dem Substrat verursacht wird. Dabei hat es sich als möglich erwiesen, einen größeren elektromechanischen Kopplungsfaktor K zu erreichen, indem der IDT und der dünne Film auf einer Plus-Oberfläche eines LiNbO_3 -Substrats ausgebildet werden, und es hat sich außerdem herausgestellt, daß in diesem Fall die Toleranz des elektromechanischen Kopplungsfaktors K bezüglich der Dicke H des dünnen Films ebenfalls größer ist. Somit sind der IDT und der dünne Film vorzugsweise auf der Plus-Oberfläche des piezoelektrischen einkristallinen Substrats, beispielsweise eines LiNbO_3 -Substrats ausgebildet.

Die Erfindung ist nicht nur auf Oberflächenwellen-Resonatoren sondern auch auf andere Arten von Oberflächenwellenbauelementen anwendbar, wie etwa Oberflächenwellen-Filter, die mit Love-Wellen arbeiten.

Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1A eine perspektivische Ansicht eines Oberflächenwellenbauelements gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 1B einen Schnitt längs der Linie B-B in Fig. 1A;

Fig. 2 die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von Oberflächenwellen von dem Verhältnis H/λ bei Proben von Oberflächenwellen-Resonatoren nach einem Versuchsbeispiel gemäß der Erfindung;

Fig. 3 die Abhängigkeit des elektromechanischen Kopplungsfaktors K von dem Verhältnis H/λ bei Proben nach dem Versuchsbeispiel;

Fig. 4 ein Beispiel einer Impedanz/Frequenz-Charakteristik eines Oberflächenwellen-Resonators nach dem Versuchsbeispiel gemäß der Erfindung;

Fig. 5 Änderungen der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Temperatur bei Proben nach dem Versuchsbeispiel;

Fig. 6 die Abhängigkeit des elektromechanischen Kopplungsfaktors K von dem Verhältnis $H(\text{ZnO})/\lambda$ für unterschiedliche Drehwinkel des Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO_3 -Substrats;

Fig. 7 eine vergrößerte Teilansicht einer Elektrode zur Erläuterung des Begriffs des Metallisierungsverhältnisses;

Fig. 8 die Abhängigkeit des elektromechanischen Kopplungsfaktors K vom Metallisierungsverhältnis für Oberflächenwellen-Resonatoren gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung und einem Vergleichsbeispiel eines herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonators;

Fig. 9 die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von Oberflächenwellen vom Verhältnis $H(\text{Au})/\lambda$ für herkömmliche Love-Wellen-Resonatoren;

Fig. 10 die Abhängigkeit des elektromechanischen Kopplungsfaktors K von dem Verhältnis $H(\text{Au})/\lambda$ für herkömmliche Love-Wellen-Resonatoren;

Fig. 11 die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von Oberflächenwellen von dem Verhältnis H/λ für Proben von Oberflächenwellen-Resonatoren gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 12 die Abhängigkeit des elektromechanischen Kopplungsfaktors K von dem Verhältnis H/λ für dieses weitere Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 13 die Beziehung zwischen der relativen Dicke H/λ des ZnO -Films auf einem 36° Y-Schnitt LiTaO_3 -Substrat und der Schallgeschwindigkeit der Oberflächenwellen;

Fig. 14 die Beziehung zwischen dem elektromechanischen Kopplungsfaktor K und der Dicke H/λ des ZnO -

Films auf dem 36° Y-Schnitt LiTaO₃-Substrat;

Fig. 15 die Beziehung zwischen der Dicke H/λ eines CdS-Films auf einem 36° Y-Schnitt LiTaO₃-Substrat und dem elektromechanischen Kopplungsfaktor K ; und

Fig. 16 eine perspektivische Ansicht eines Beispiels eines Oberflächenwellenbauelements, bei dem die Erfindung eingesetzt wird.

Erstes Ausführungsbeispiel

Ein Oberflächenwellenbauelement 1 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in Fig. 1A in perspektivischer Ansicht und in Fig. 1B in einem Schnitt längs der Linie B-B in Fig. 1A gezeigt.

Die Oberflächenwellenbauelement 1 ist als Oberflächenwellen-Resonator ausgebildet, der mit Love-Wellen arbeitet. Dieses Oberflächenwellenbauelement 1 umfaßt ein Y-Schnitt X-Ausbreitungs LiNbO₃-Substrat 2 und einen IDT 5, der so auf einer oberen Oberfläche des LiNbO₃-Substrats 2 angeordnet ist, daß mehrere Elektrodenglieder von Kammelektroden 3 und 4 derselben ineinandergreifen. Der IDT 5, der in diesem Ausführungsbeispiel aus Al hergestellt ist, kann alternativ auch aus anderen metallischen Materialien wie etwa Cu oder Ni hergestellt sein.

Ein dünner ZnO-Film 6 ist so auf dem LiNbO₃-Substrat 2 angeordnet, daß er den IDT bedeckt. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist das Verhältnis H/λ zwischen der Dicke H des ZnO-Films und der Wellenlänge λ der erregten Love-Wellen in einem Bereich von 0,05 bis 0,2 gewählt, wie aus dem nachfolgend beschriebenen Versuchsbeispiel hervorgeht.

Der Grund, weshalb das Verhältnis H/λ im Bereich von 0,05 bis 0,2 gewählt werden sollte, wird nunmehr unter Bezugnahme auf das Versuchsbeispiel erläutert.

LiNbO₃-Substrate 2 von 2,0 mm Breite, 1,8 mm Länge und 0,5 mm Dicke wurden vorbereitet, und verschiedene IDTs 5 und ZnO-Filme 6 mit unterschiedlichen Elektrodenglieder-Rastern bzw. Dicken wurden darauf ausgebildet, so daß eine Vielzahl von Typen von Oberflächenwellen-Resonatoren hergestellt wurde. An den so erhaltenen Oberflächenwellen-Resonatoren wurden die Oberflächenwellen-Phasengeschwindigkeiten und die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K gemessen. Die Resultate sind in Fig. 2 und 3 gezeigt. Bei den in Fig. 2 gezeigten Phasengeschwindigkeiten betrifft die Kurve "offen" die Werte für Zustände mit offenem Stromkreis in der Ebene des IDT, und die Kurve "kurz" betrifft Werte für kurzgeschlossene Zustände in der Ebene des IDT.

In Fig. 2 und 3 ist deutlich zu erkennen, daß Love-Wellen erregt wurden, wenn die Verhältnisse $H(\text{ZnO})/\lambda$ mehr als 0,05 betrugen. Es ist weiterhin zu erkennen, daß die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K , die bei einem Verhältnis von 0,05 einen relativ hohen Wert von mindestens 50% hatten, mit zunehmendem Verhältnis $H(\text{ZnO})/\lambda$ abnahmen, jedoch bei einem Verhältnis von 0,2 immer noch mehr als 40% betrugen. Somit sollte das Verhältnis H/λ gemäß der Erfindung im Bereich von 0,05 bis 0,2 gewählt werden.

Tabelle 1 zeigt elektromechanische Kopplungsfaktoren K und Werte der Temperaturabhängigkeit von Frequenzen (Änderungsraten in Einheiten ppm in der Form von Verhältnissen $\Delta f/f$ pro Temperatureinheit, wobei f Resonanzfrequenzen angibt und Δf die Änderungen der Resonanzfrequenzen angibt), für Frequenzen in herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonatoren, die mit Love-Wellen und mit Rayleigh-Wellen arbeiten, und für Proben von mit Love-Wellen arbeitenden Oberflächenwellen-Resonatoren gemäß dem Ausführungsbeispiel der Erfindung.

In Tabelle 1 bedeutet "LN" LiNbO₃-Substrate und "Y-X" bedeutet Y-Schnitt X-Ausbreitungs-Substrate.

Tabelle 1

Struktur	TCF(ppm/°C)	Wellentyp	K(%)
Au/LN(Y-X)	-112	Love	mindestens 55
LN(128° Y-X)	- 74	Rayleigh	23,5
SiO ₂ /LN (128° Y-X)	0	Rayleigh	27,6
LN(41° Y-X)	- 78-80	leckend	41,5
LN(64° Y-X)	- 79-81	leckend	33,6
LN(41° Y-X)	- 59	SSBW	40,9
LT(36° Y-X)	- 45	SSBW	21,7
ZnO/AI/LN(Y-X) (H/λ = 0,09)	- 76	Love	50
ZnO/AI/LN(Y-X) (H/λ = 0,16)	- 66	Love	42,4

Zum Vergleich zeigen Fig. 9 und 10 die Beziehungen zwischen Oberflächenwellen-Phasengeschwindigkeiten, elektromechanischen Kopplungsfaktoren und den Elektrodendicken $H(\text{Au})/\lambda$ für herkömmliche Love-Wellen-Einrichtungen, die durch Au-Elektroden auf Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substraten gebildet wurden. In Fig. 9 zeigt die Kurve "offen" Werte für Zustände mit offenem Stromkreis in der Ebene des IDT und die Kurve "kurz" zeigt Werte für kurzgeschlossene Zustände in der Ebene des IDT.

Aus Tabelle 1 und Fig. 9 und 10 geht deutlich hervor, daß in den herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonatoren mit LiNbO₃-Substraten und darauf ausgebildeten Au-Elektroden keine Love-Wellen angeregt werden, wenn die Verhältnisse $H(\text{Au})/\lambda$ nicht wenigstens 0,025 betragen. Somit war es nicht möglich, einen Oberflächenwellen-Resonator mit niedriger Frequenz zu erhalten, wenn nicht die Dicke der Elektroden vergrößert wurde (entsprechend der Zunahme von λ).

Außerdem zeigt Tabelle 1, daß herkömmliche Oberflächenwellen-Resonatoren, die mit Rayleigh-Wellen arbeiteten, nur kleine elektromechanische Kopplungsfaktoren K von höchstens 30% aufwiesen, unabhängig von der Art des Substrats, und daß es somit nicht möglich war, eine hohe Bandbreite zu erreichen.

Bei den erfindungsgemäßen Oberflächenwellen-Resonatoren nach diesem Ausführungsbeispiel war es dagegen möglich, eine hohe Bandbreite mit hohen elektromechanischen Kopplungsfaktoren K von wenigstens 40% bei beiden H/λ -Verhältnissen von 0,09 und 0,16 zu erhalten.

Außerdem geht aus Fig. 3 hervor, daß eine Vorrichtung mit kleiner Frequenz hergestellt werden kann, ohne daß die Elektrodendicke vergrößert werden muß, da der elektromechanische Kopplungsfaktor sich mit der Dicke des ZnO-Films ändert, und zwar auch dann, wenn die Dicke der Elektroden konstant gehalten wird.

Im Zusammenhang mit dem Oberflächenwellen-Resonator nach dem oben beschriebenen Ausführungsbeispiel wurde eine Probe mit einem IDT aus Al mit 25 Paaren von Elektrodenfingern mit einem Rastermaß von Finger zu Finger von 4,5 µm, einer Finger-Überdeckungsbreite von 526 µm und einem Metallisierungsverhältnis von 0,51, wie unten beschrieben wird, und mit einem dünnen ZnO-Film mit einer Dicke von 2,0 µm hergestellt, und an dieser Probe wurden die Impedanz/Frequenz-Kennlinie und die Temperaturabhängigkeit $\Delta f/f$ der Resonanzfrequenz gemessen. Die Ergebnisse sind in Fig. 4 und 5 gezeigt.

Aus Fig. 5 geht deutlich hervor, daß der Oberflächenwellen-Resonator nach diesem Ausführungsbeispiel einen Frequenz/Temperatur-Koeffizienten TCF von -66 ppm/°C aufwies, was besser ist als der TCF-Wert von -112 ppm/°C bei dem herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonator mit Love-Wellen (siehe Tabelle 1). Somit ermöglicht die Erfindung auch eine Verringerung der Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz.

Weiterhin wurden IDTs ähnlich dem obigen auf drei verschiedenen Arten von LiNbO₃-Substraten ausgebildet, die unterschiedliche Schnittwinkel aufwiesen, und es wurden dann die Beziehungen zwischen den elektromechanischen Kopplungsfaktoren K und den Verhältnissen H/λ untersucht. Die Ergebnisse sind Fig. 6 gezeigt. Die Kurven für $\Theta = 0^\circ$, $\Theta = 15^\circ$ und $\Theta = 30^\circ$ zeigen die Ergebnisse für ein Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substrat, ein um 5° gedrehtes Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substrat und ein um 30° gedrehtes Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substrat.

Wie aus Fig. 6 hervorgeht, wiesen die Proben mit allen drei Substraten ausreichende elektromechanische Kopplungsfaktoren K bei Verhältnissen $H(\text{ZnO})/\lambda$ im Bereich von 0,05 bis 0,25 auf, bei Drehwinkeln von bis zu

30°.

Sodann wurden Änderungen der elektromechanischen Kopplungsfaktoren in Abhängigkeit vom Metallisierungsverhältnis der IDTs experimentell überprüft. Es wurden Proben von Oberflächenwellen-Resonatoren mit ZnO-Filmen, IDTs aus Al und Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substraten hergestellt, die unterschiedliche Verhältnisse zwischen der Elektrodenfinger-Breite a und dem Finger-zu-Finger-Abstand b , d. h., unterschiedliche Metallisierungsverhältnisse a/b aufwiesen, wie vergrößert in Fig. 7 gezeigt ist. An diesen Proben wurden die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K gemessen. Die ZnO-Filme hatten eine Dicke von 3 μm , und die IDTs aus Al hatten eine Dicke von 0,3 μm (3000 Å).

Die Ergebnisse sind Tabelle 2 und in Fig. 8 dargestellt. Zum Vergleich zeigt Fig. 8 auch die Beziehung zwischen dem elektromechanischen Kopplungsfaktor K und dem Metallisierungsverhältnis bei einem herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonator mit einem IDT, der durch einen 1,0 μm dicken Au-Film auf einem Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substrat gebildet wurde (Metallisierungsverhältnis = 0,5).

Tabelle 2

Metallisierungsverhältnis	Resonanzfrequenz	Impedanzverhältnis (dB)	$\Delta f/f_r(\%)$
0,43	174,5	51,3	12,1
0,51	175,4	51,6	11,8
0,63	173,6	50,2	11,5
0,74	173,3	41,8	10,3

(ZnO : 2 μm Al: 3000 Å)

$\Delta f = |\text{Antiresonanzfrequenz} - \text{Resonanzfrequenz}|$
 f_r : Resonanzfrequenz

Aus Tabelle 2 und Fig. 8 geht deutlich hervor, daß elektromechanische Kopplungsfaktoren K von mindestens 40% erhalten werden können, wenn das Metallisierungsverhältnis im Bereich von 0,1 bis 0,7 liegt. Insbesondere nimmt der Kopplungsfaktor K bei den erfindungsgemäßen Proben zu, wenn das Metallisierungsverhältnis innerhalb des Bereichs von 0,2 bis 0,7 verringert wird.

Ein Love-Wellen-Resonator mit Au-Elektroden kann nicht angeregt werden, sofern sein Metallisierungsverhältnis nicht wenigstens 0,5 beträgt. Bei dem erfindungsgemäßen Love-Wellen-Resonator ist es dagegen möglich, den elektromechanischen Kopplungsfaktor K selbst dann auf mindestens 40% zu steigern, wenn das Metallisierungsverhältnis nicht mehr als 0,5 beträgt, wie oben beschrieben wurde. Somit ist es möglich, einen breitbandigen Oberflächenwellen-Resonator zu erhalten, bei dem das Metallisierungsverhältnis auf einen Wert von höchstens 0,5 eingestellt ist. Allerdings wird die Herstellung des Resonators schwierig, wenn das Metallisierungsverhältnis weniger als 0,1 beträgt. Andererseits nimmt der elektromechanische Kopplungsfaktor K extrem ab oder es wird leicht ein Brummen oder eine Welligkeit verursacht, wenn das Metallisierungsverhältnis 0,7 übersteigt. Aus diesem Grund wird das Metallisierungsverhältnis vorzugsweise im Bereich von 0,1 bis 0,7 gewählt.

In Fig. 6 weist die Kennlinie für $\Theta = 15^\circ$ in Nähe des Verhältnisses $H(\text{ZnO})/\lambda$ von 0,11 einen beträchtlichen Sprung auf, da bei diesem Verhältnis von $H(\text{ZnO})/\lambda$ eine Modenänderung vorgerufen wurde.

Zweites Ausführungsbeispiel

Die Erfinder haben erkannt, daß es möglich ist, bei dem in Fig. 1A und 1B gezeigten Love-Wellen-Resonator den elektromechanischen Kopplungsfaktor K zu erhöhen, wenn der IDT und der ZnO-Film auf einer Plus-Oberfläche eines Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substrats und nicht auf der Minus-Oberfläche dieses Substrats ausgebildet werden.

Nunmehr sollen anhand eines Versuchsbeispiels die Unterschiede in den Ausbreitungseigenschaften von Love-Wellen für die Fälle erläutert werden, in denen der IDT und der ZnO-Film einmal auf der Plus-Oberfläche und einmal auf der Minus-Oberfläche eines LiNbO₃-Substrats ausgebildet sind.

Es wurden mehrere Typen von Oberflächenwellen-Resonatoren vorbereitet unter Verwendung von LiNbO₃-Substraten mit einer Breite von 2,0 mm, einer Länge von 1,8 mm und einer Dicke von 0,5 mm, und verschiedenen IDTs mit unterschiedlichen Finger-zu-Finger-Abständen und unterschiedlichen ZnO-Filmdicken wurden auf den Plus- oder Minus-Oberflächen der Substrate ausgebildet. An den so erhaltenen Oberflächenwellen-Resonatoren wurden die Oberflächenwellen-Phasengeschwindigkeiten und die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K gemessen. Die Ergebnisse sind in Fig. 11 und 12 gezeigt.

In diesen Figuren betreffen die durchgezogenen Linien Proben, bei denen die IDTs und die ZnO-Filme auf den Plus-Oberflächen der LiNbO₃-Substrate ausgebildet waren, und die gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse für Proben, bei denen die IDTs und die ZnO-Filme auf den Minus-Oberflächen der LiNbO₃-Substrate ausgebildet waren. In Fig. 11 zeigen die Kurven "offen" die Ergebnisse für Zustände mit offenem Stromkreis in der Ebene des IDT und die Kurven "kurz" zeigen die Ergebnisse für kurzgeschlossene Zustände in der Ebene des IDT.

Während die Werte in Fig. 2, 3, 6, 8, 9 und 10 nach der Finite-Elemente-Methode unter Berücksichtigung des Vorhandenseins des IDT berechnet wurden, wurden die Werte in Fig. 11 und 12 nach einem Verfahren berechnet, das von J.J. Campbell et al. vorgeschlagen wurde (J.J. Campbell, W.R. Jone: "A method for estimating optimal crystal cuts and propagating directions for excitation of piezoelectric surface waves", IEEE trans., su- 15,4, Seite 209 (Oktober 1968)). Die letzteren Werte sind etwas kleiner als die nach der Finite-Elemente-Methode.

Aus Fig. 11 und 12 geht deutlich hervor, daß Love-Wellen sowohl bei der Plus-Oberfläche als auch bei der Minus-Oberfläche angeregt wurden, sofern das Verhältnis H/λ mindestens 0,05 betrug. Die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K betrugen etwa 48% auf der Plus-Oberfläche und etwa 46% auf der Minus-Oberfläche, wenn das Verhältnis H/λ beispielsweise 0,11 betrug, und nahmen mit zunehmendem Verhältnis H/λ ab. Mit anderen Worten, auf der Plus-Oberfläche des Substrats wurden höhere elektromechanische Kopplungsfaktoren K erreicht. Bei der Plus-Oberfläche wurden elektromechanische Kopplungsfaktoren K, die den Sollwert von 40% überschritten, erreicht, wenn die Verhältnisse H/λ bis zu 0,2 betrugen.

Es ist weiterhin zu erkennen, daß die Abhängigkeit des elektromechanischen Kopplungsfaktors K von dem Verhältnis $H(\text{ZnO})/\lambda$ bei der Plus-Oberfläche kleiner ist, so daß größere elektromechanische Kopplungsfaktoren K in Bezug auf die Dicke des ZnO-Films ermöglicht werden.

Weiterhin zeigt Fig. 12, daß ein Oberflächenwellen-Resonator mit kleiner Frequenz hergestellt werden kann, ohne daß die Elektrodendicke erhöht werden muß, da der elektromechanische Kopplungsfaktor K auch bei ungeänderter Elektrodendicke verändert werden kann, indem die Dicke des ZnO-Films variiert wird.

Es wurde außerdem bestätigt, daß die Temperaturabhängigkeit der Frequenzcharakteristik bei dem erfindungsgemäßen Oberflächenwellen-Resonator kleiner ist als bei herkömmlichen Oberflächenwellen-Resonatoren, die mit Love-Wellen arbeiten.

Drittes Ausführungsbeispiel

Gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung wird als piezoelektrisches Substrat ein um 36° gedrehtes Y-Schnitt-LiTaO₃-Substrat (im folgenden kurz als LiTaO₃-Substrat bezeichnet) verwendet, und ein dünner Film aus ZnO, CdS oder Ta₂O₅ wird auf dem LiTaO₃-Substrat ausgebildet.

Für das um 36° gedrehte Y-Schnitt LiTaO₃-Substrat wurde gefunden, daß es einen Schnittwinkel besitzt, bei dem bei der Berechnung von Leck-Oberflächenwellen an der gedrehten Y-Schnittfläche keine Dämpfung auftritt, und es wurde als ein Oberflächenwellen-Substrat für SH-Wellen beschrieben ("SH-Type and Rayleigh Type Surface Acoustic Waves in LiTaO₃" von Nakamura, Inmi und Shimizu, JEICE Tech. Report (Japan), US 77-42 (1077)). Es ist bekannt, daß dieses LiTaO₃-Substrat eine Temperaturcharakteristik TCF von etwa -25 bis 35 ppm/°C hat.

Proben von piezoelektrischen Substraten wurden hergestellt, indem dünne ZnO-Filme unterschiedlicher Dicke auf den oben erwähnten LiTaO₃-Substraten mit ausgezeichneter Temperaturcharakteristik aufgebracht wurden, um die Anregung von Love-Wellen zu untersuchen. Die Anregung von Love-Wellen wurde sowohl für auf den Plus-Oberflächen als auch für auf den Minus-Oberflächen der LiTaO₃-Substrate ausgebildete ZnO-Filme untersucht.

Die folgende piezoelektrische Grundgleichung, Bewegungsgleichung und Maxwell-Gleichung gelten sowohl für LiTaO₃-Substrate als auch für die ZnO-Filme:

Piezoelektrische Grundgleichung

$$T_i = C_{ij}S_j - \Theta_{mi}E_m$$

$$D_n = \Theta_{nh}S_h + \epsilon_{nm}E_m$$

Bewegungsgleichung

$$P \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_j}{\partial x_j}$$

Maxwell-Gleichung

$$\text{Div } D = 0$$

Um Love-Wellen anzuregen, kann für eine solche Schallgeschwindigkeit gesorgt werden, daß diese Gleichungen jeweilige Randbedingungen an der Oberfläche des ZnO-Films und an der Grenze zwischen dem ZnO-Film und dem LiTaO₃-Substrat erfüllen. Wenn der IDT auf dem piezoelektrischen Substrat ausgebildet wird, so ergibt sich der elektromechanische Kopplungsfaktor K im Fall eines elektrischen Kurzschlusses in der Ebene des IDT aus einer Oberflächenwellengeschwindigkeit V_m und im Fall eines offenen Stromkreises in der Ebene des IDT aus

einer Oberflächenwellengeschwindigkeit V_f .

Fig. 13 zeigt die Ergebnisse der Messung der oben genannten Oberflächenwellengeschwindigkeiten V_f und V_m an piezoelektrischen Substraten, die erhalten wurden durch Ablagerung von ZnO-Filmen unterschiedlicher Dicke auf den zuvor erwähnten LiTaO₃-Substraten. In Fig. 13 betreffen die Markierungen o und ● die Schallgeschwindigkeiten V_f von Love-Wellen an freien Grenzflächen bzw. die Schallgeschwindigkeiten V_m von Love-Wellen an metallisierten Grenzflächen der ZnO-Filme, die auf Plus-Oberflächen des LiTaO₃-Substrats ausgebildet wurden. Die Markierungen Δ und | geben dagegen die Schallgeschwindigkeiten V_f von Love-Wellen bzw. die Schallgeschwindigkeiten V_m von Love-Wellen an metallisierten Grenzflächen der ZnO-Filme an, die auf Minus-Oberflächen des LiTaO₃-Substrats ausgebildet wurden.

Aus Fig. 13 geht deutlich hervor, daß die Schallgeschwindigkeiten für die beiden ZnO-Filme, die auf der Plus- und der Minus-Oberfläche ausgebildet waren, unverändert geblieben sind.

Weiterhin geben in Fig. 13 die Markierungen X und + die Schallgeschwindigkeiten von Rayleigh-Wellen auf den ZnO-Filmen an, die auf der Plus- bzw. Minus-Oberfläche des LiTaO₃-Substrats ausgebildet waren. Es ist zu erkennen, daß die Schallgeschwindigkeiten V_f und V_m auf den freien und metallisierten Grenzflächen im wesentlichen übereinstimmen, so daß der elektromechanische Kopplungsfaktor den Wert 0 hatte, und keine Rayleigh-Wellen angeregt wurden. Es ist ebenso zu erkennen, daß die erfindungsgemäßen piezoelektrischen Substrate kaum durch Rayleigh-Wellen-Komponenten beeinflusst wurden, da zwischen den Schallgeschwindigkeiten V_f und V_m der Love-Wellen keine Rayleigh-Wellen-Komponenten existierten.

Fig. 14 zeigt elektromechanische Kopplungsfaktoren K_s von Proben, die hergestellt wurden, indem dünne ZnO-Filme unterschiedlicher Dicken auf den zuvor genannten LiTaO₃-Substraten aufgebracht wurden. In Fig. 14 bezeichnen die Markierungen o Ergebnisse von Proben, bei denen die ZnO-Filme auf den Plus-Oberflächen der LiTaO₃-Substrate aufgebracht waren, und die Markierungen Δ bezeichnen die Ergebnisse für Proben, bei denen die ZnO-Filme auf den Minus-Oberflächen ausgebildet waren. Es geht deutlich aus Fig. 14 hervor, daß die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K_s für die Proben mit den ZnO-Filmen auf den Plus-Oberflächen etwas größer waren als bei den Proben mit den ZnO-Filmen auf den Minus-Oberflächen.

Außerdem ist zu erkennen, daß der elektromechanische Kopplungsfaktor über 22% im Vergleich zu dem Fall ohne ZnO-Film gesteigert werden kann, indem die relative Dicke H/λ des ZnO-Films im Bereich von 0,02 bis 0,13 eingestellt wird, egal, auf welcher Oberfläche der ZnO-Film ausgebildet wird. Somit hat das erfindungsgemäße piezoelektrische Substrat eine ausgezeichnete Temperaturcharakteristik TCF von etwa -25 bis -32 ppm/°C, da sowohl der ZnO-Film als auch das LiTaO₃-Substrat verhältnismäßig gute Temperaturcharakteristiken TCF (TCF = -30 ppm/°C bei dem ZnO-Film und TCF = -25 bis -32 ppm/°C bei dem LiTaO₃-Substrat) aufweisen, und der elektromechanische Kopplungsfaktor kann relativ gesteigert werden, indem die Dicke des ZnO-Films in den zuvor genannten speziellen Bereich gewählt wird.

Fig. 15 zeigt elektromechanische Kopplungsfaktoren K_s von Love-Wellen in Proben, die hergestellt wurden, indem dünne CdS-Filme unterschiedlicher Dicke anstelle der ZnO-Filme auf den Plus-Oberflächen der zuvor erwähnten LiTaO₃-Substrate aufgebracht wurden. Wie aus Fig. 15 hervorgeht, war es möglich, die elektromechanischen Kopplungsfaktoren K_s auf wenigstens 24% im Vergleich zu Substraten ohne CdS-Filme zu steigern, wenn die Dicken (H/λ) der CdS-Filme in einem Bereich von 0,01 bis 0,10 gewählt wurden, wodurch man piezoelektrische Substrate mit hohen elektromechanischen Kopplungsfaktoren für Love-Wellen erhielt. Auch die piezoelektrischen Substrate nach diesem Ausführungsbeispiel zeichneten sich durch ausgezeichnete Temperaturcharakteristiken TCF von etwa -25 bis -32 ppm/°C aus, da die CdS-Filme und die LiTaO₃-Substrate ausgezeichnete Temperaturcharakteristiken (TCF = -41 ppm/°C für die CdS-Filme) aufwiesen.

Auf den zuvor erwähnten LiTaO₃-Substraten wurden dünne Filme aufgebracht, die kleinere Schallgeschwindigkeiten für Love-Wellen aufwiesen als die LiTaO₃-Substrate. Solch ein dünner Film kann anstelle von ZnO oder CdS auch aus einem Material wie etwa Ta₂O₅ hergestellt werden.

Das dritte Ausführungsbeispiel der Erfindung kann nach einem Verfahren realisiert werden, wie es grundsätzlich für ein Oberflächenwellenbauelement bekannt ist, das das zuvor genannte piezoelektrische Substrat für einen konkreten Aufbau des Oberflächenwellenbauelements verwendet, wie etwa die Bildung von Doppelkamm-Elektroden. Beispielsweise ist es möglich, einen Resonator mit ausgezeichneten Temperatur- und Resonanz-Charakteristiken zu schaffen, indem das piezoelektrische Substrat nach dem zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel in einem Oberflächenwellen-Resonator 1 des End-Reflektionstyps verwendet wird, wie er in Fig. 16 gezeigt ist. Der Oberflächenwellen-Resonator 1 nach Fig. 16 umfaßt ein piezoelektrisches Substrat 2, das nach der vorliegenden Erfindung ausgebildet ist, und zwei Kammelektroden 3a und 3b mit mehreren ineinandergreifenden Elektrodenfingern.

Es ist daran zu erinnern, daß die Werte in Fig. 11 und 12 nach dem Verfahren von J.J. Campbell et al. berechnet wurden.

Patentansprüche

1. Oberflächenwellenbauelement, das mit Love-Wellen arbeitet mit:
 einem Substrat (2) aus einem piezoelektrischen Einkristall und wenigstens einem Interdigitalwandler (5), der auf dem Substrat (2) ausgebildet ist, dadurch gekennzeichnet,
 daß auf dem Substrat ein dünner piezoelektrischer Film (6) aus einem Material aufgebracht ist, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen kleiner ist als in dem piezoelektrischen Einkristall-Substrat (2), und
 daß das Verhältnis H/λ der Dicke H des Films (6) zur Wellenlänge λ der erregten Love-Wellen im Bereich von 0,01 bis 0,2 liegt.
2. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Film (6) aus einem

oder mehreren der folgenden Materialien hergestellt ist: ZnO, CdS, Ta₂O₅.

3. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das piezoelektrische Einkristall-Substrat (2) ein um 0 bis 30 gedrehtes Y-Schnitt X-Ausbreitungs-LiNbO₃-Substrat ist und das Verhältnis H/λ im Bereich von 0,05 bis 0,2 liegt.

4. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Film (6) aus ZnO besteht.

5. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Interdigitalwandler (5) und der Film (6) auf einer Plus-Oberfläche des LiNbO₃-Substrats (2) ausgebildet sind.

6. Oberflächenwellenbauelement nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Interdigitalwandler (5) zwei Kammelektroden (3,4) mit mehreren ineinandergreifenden Elektrodenfingern aufweist und daß das Verhältnis der Breite jedes Elektrodenfingers zu dem Finger-zu-Finger-Rastermaß im Bereich von 0,1 bis 0,7 liegt.

7. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das piezoelektrische Einkristall-Substrat (2) ein um 36° gedrehtes Y-Schnitt-LiTaO₃-Substrat ist und daß das Verhältnis H/λ im Bereich von 0,01 bis 0,13 liegt.

8. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Film (6) ein ZnO-Film ist und daß das Verhältnis H/λ im Bereich von 0,02 bis 0,13 liegt.

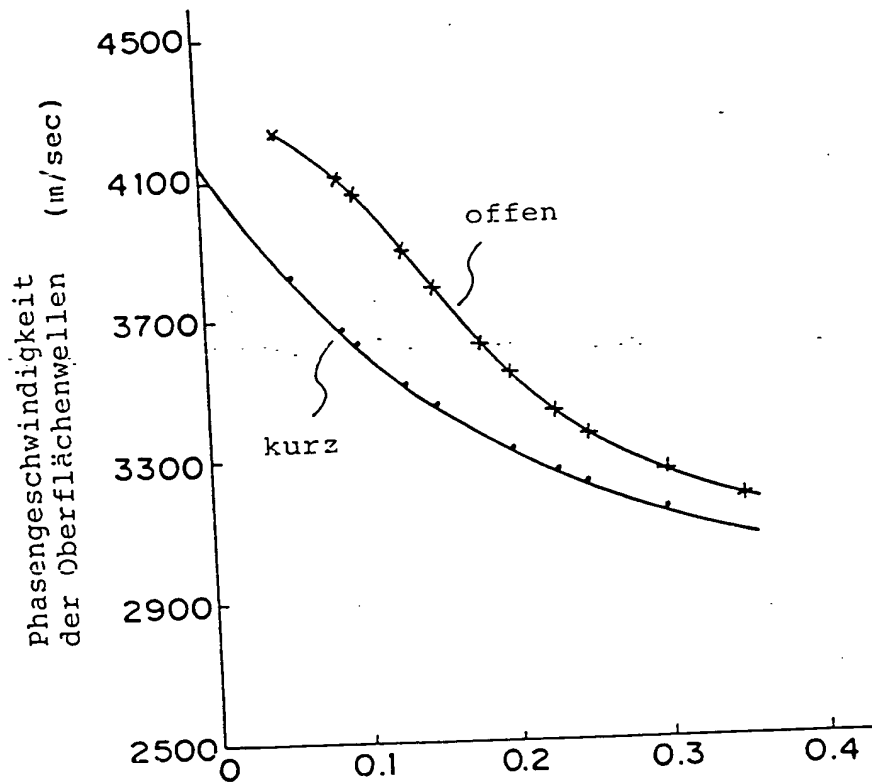
9. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Film (6) aus CdS besteht und das Verhältnis H/λ im Bereich von 0,01 bis 0,10 liegt.

10. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Interdigitalwandler (5) und der dünne Film (6) auf einer Plus-Oberfläche des LiTaO₃-Substrats (2) ausgebildet sind.

11. Oberflächenwellenbauelement nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Film (6) aus einem oder mehreren der folgenden Materialien hergestellt ist: ZnO, CdS, Ta₂O₅.

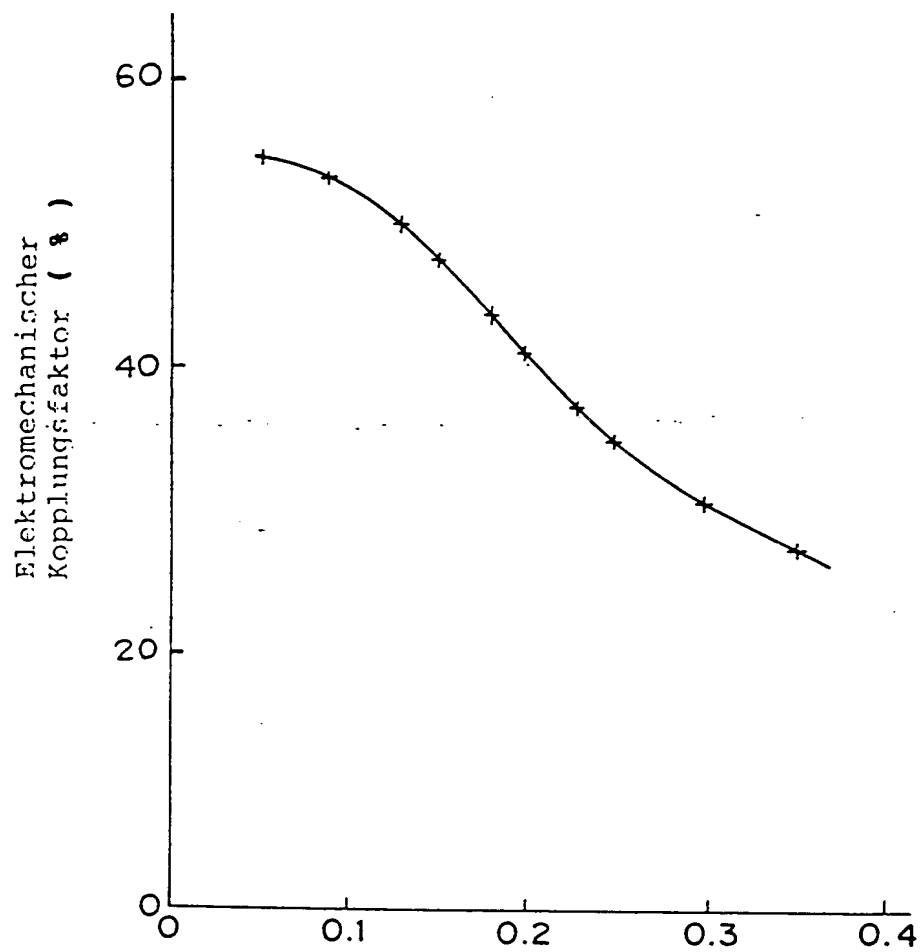
Hierzu 16 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 2



ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 3



ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 4

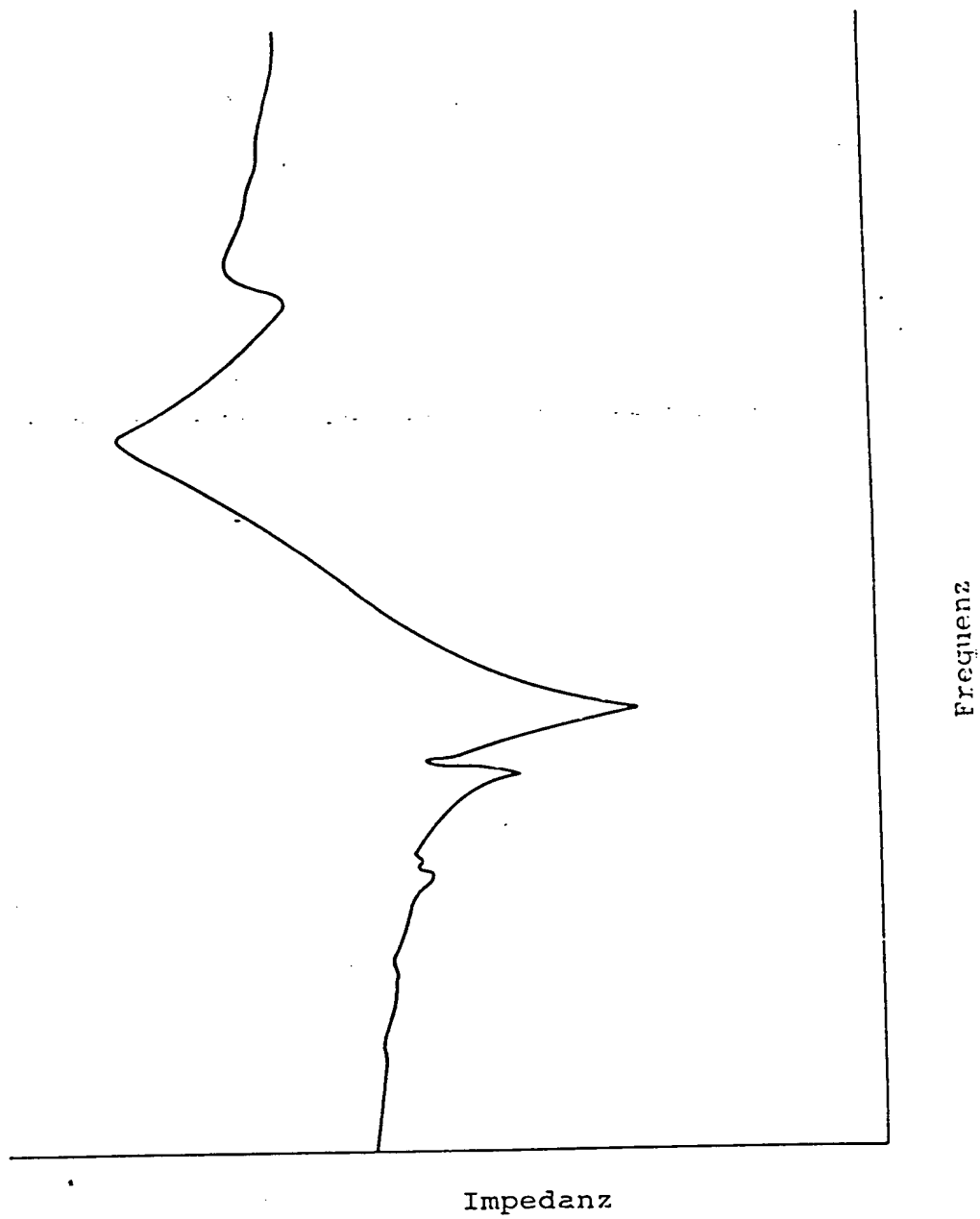


FIG. 5

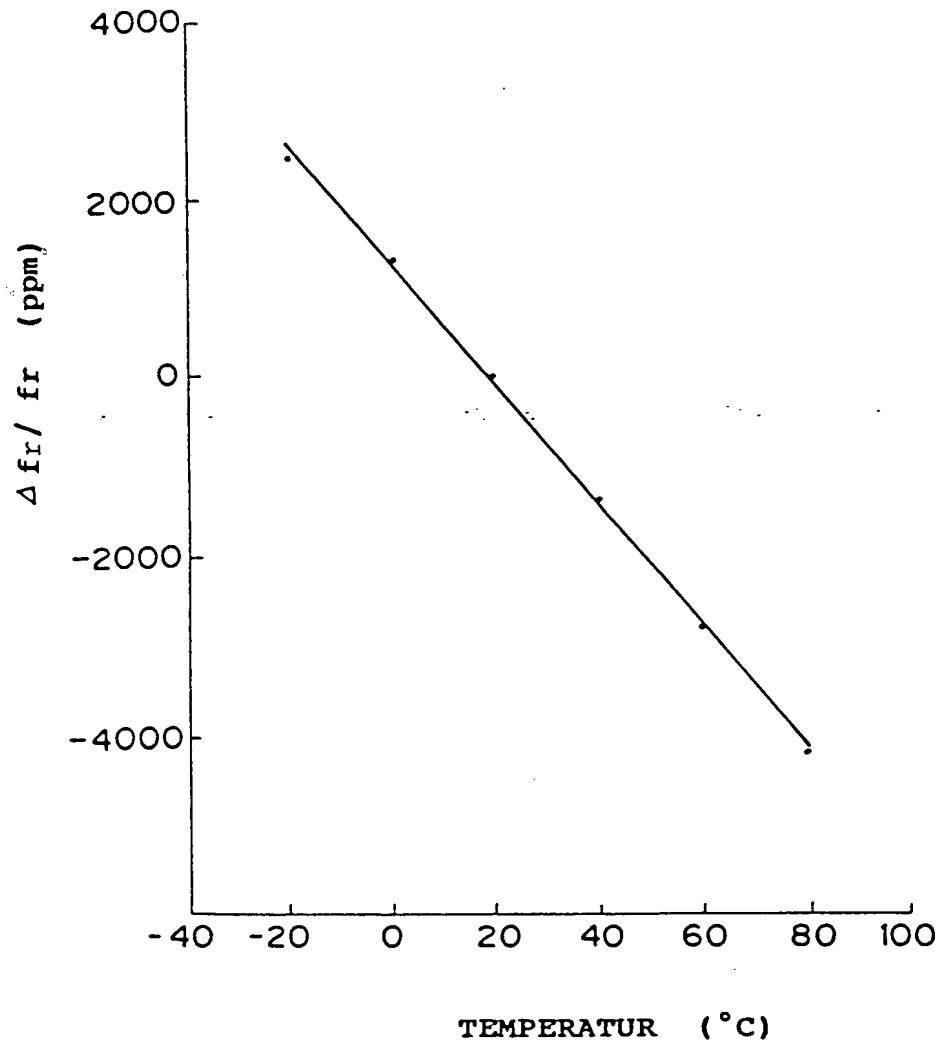
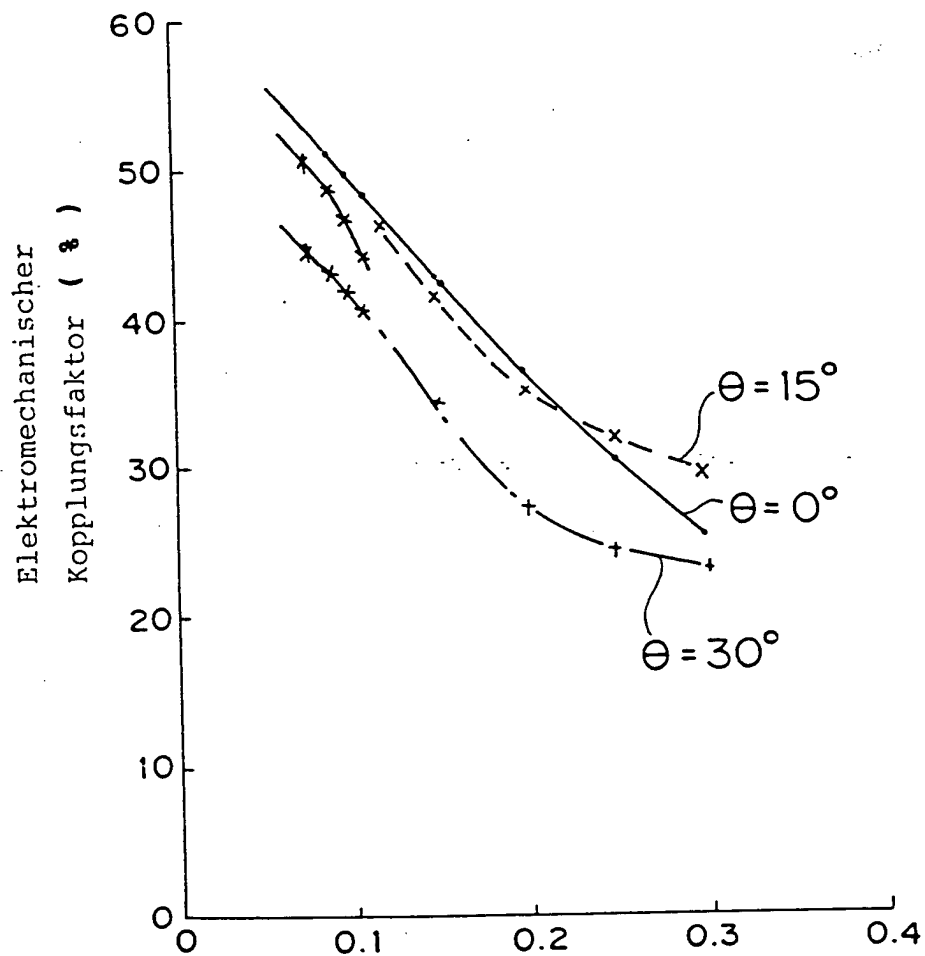


FIG. 6



ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 7

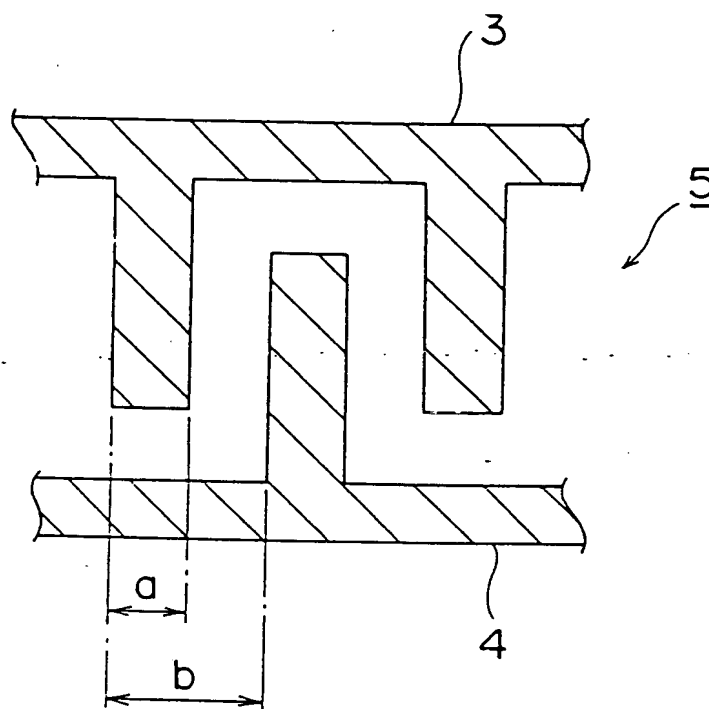


FIG. 8

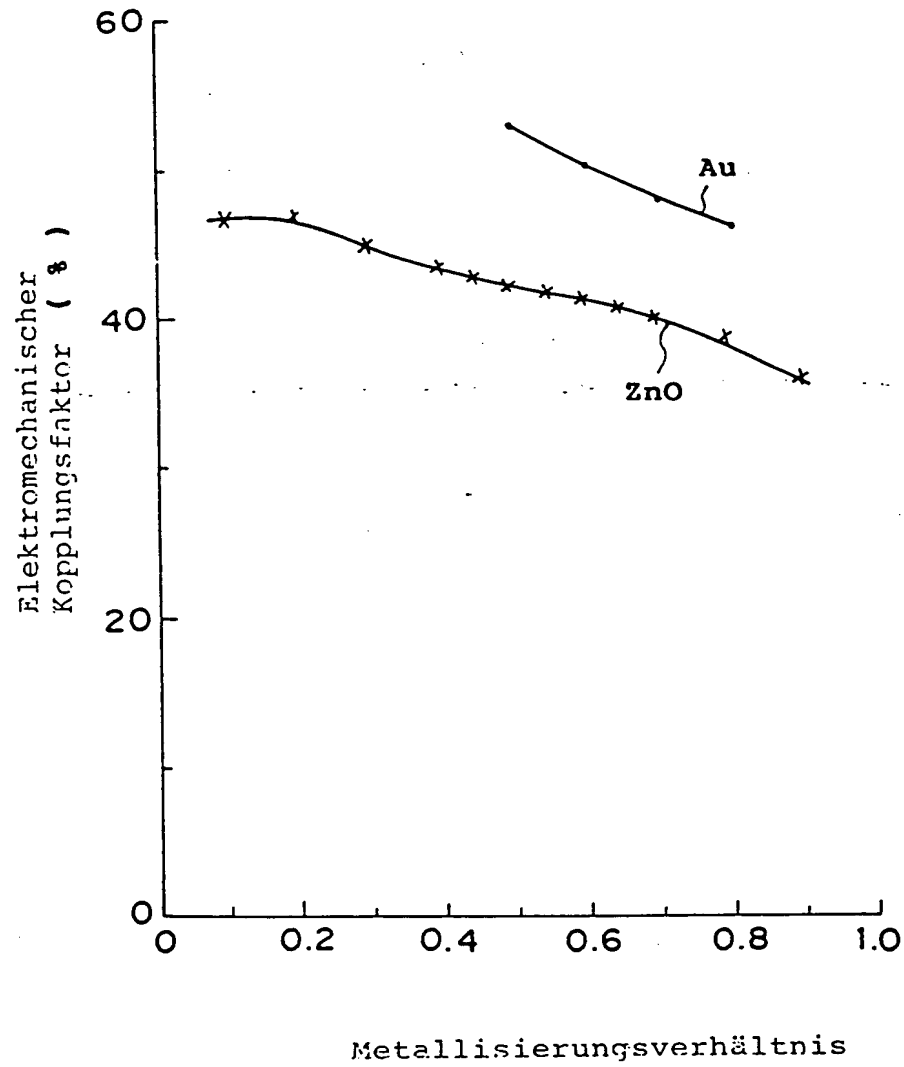
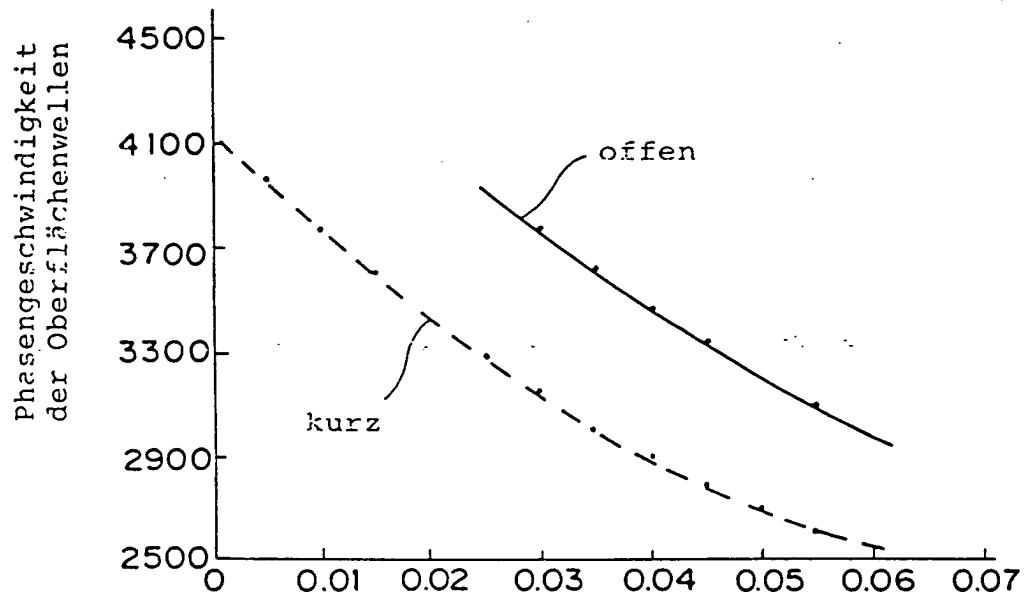


FIG.9

Stand der Technik



Au-Dicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG.10

Stand der Technik

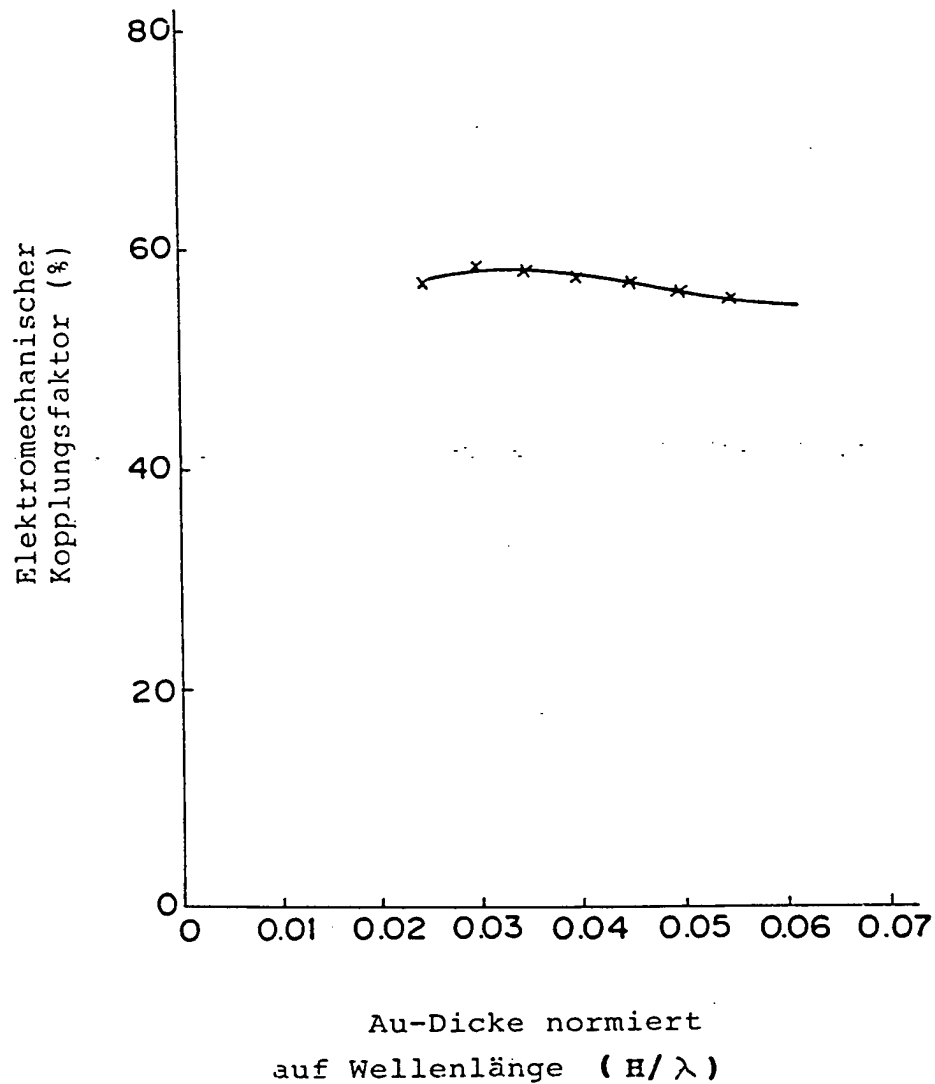
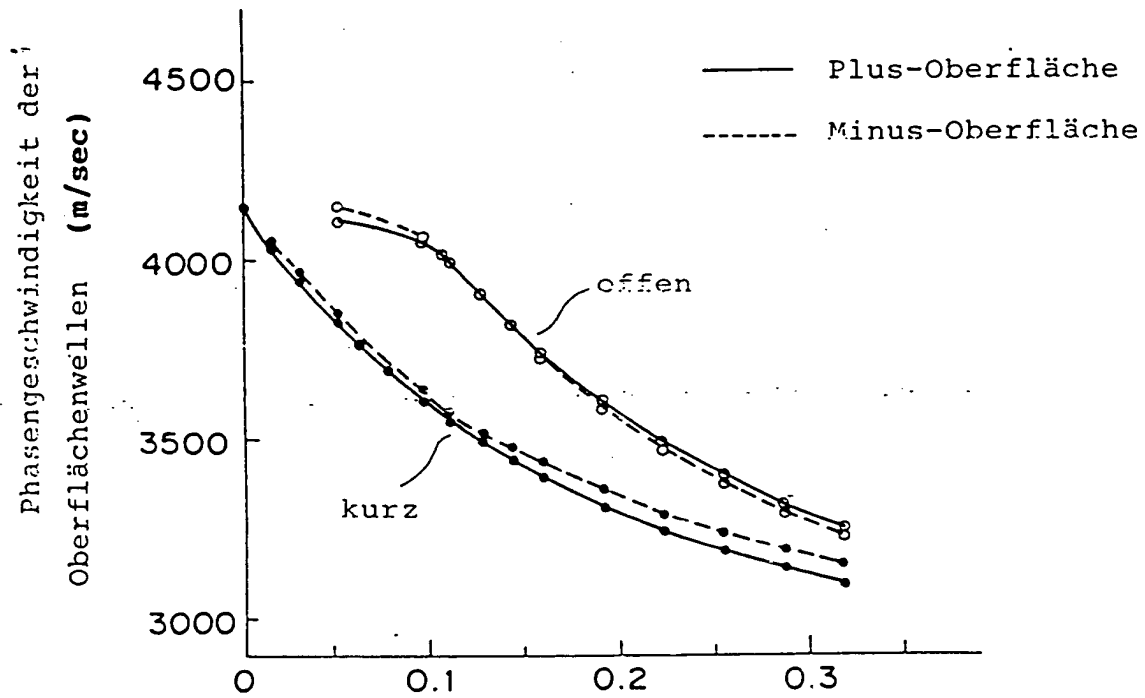
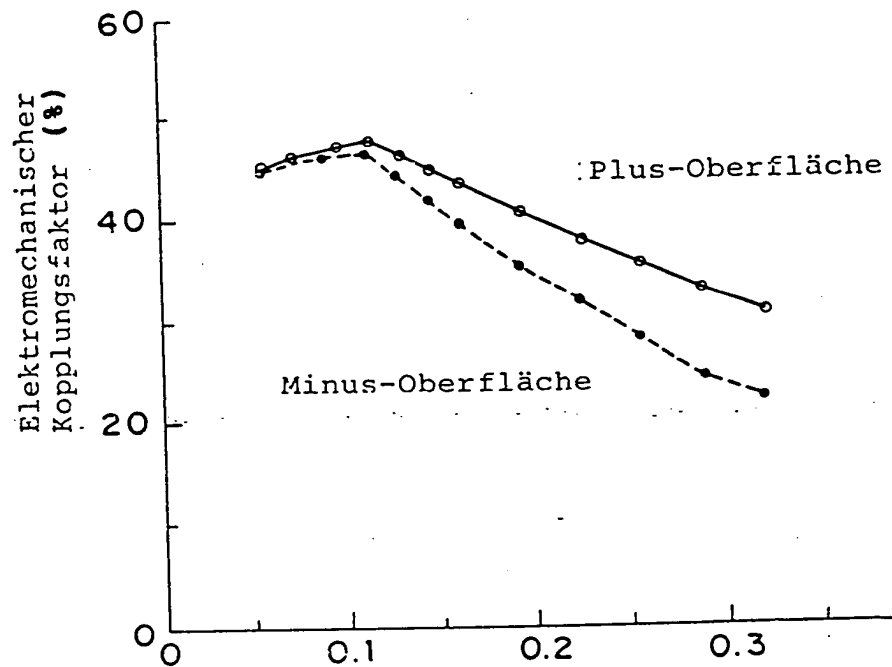


FIG. 11



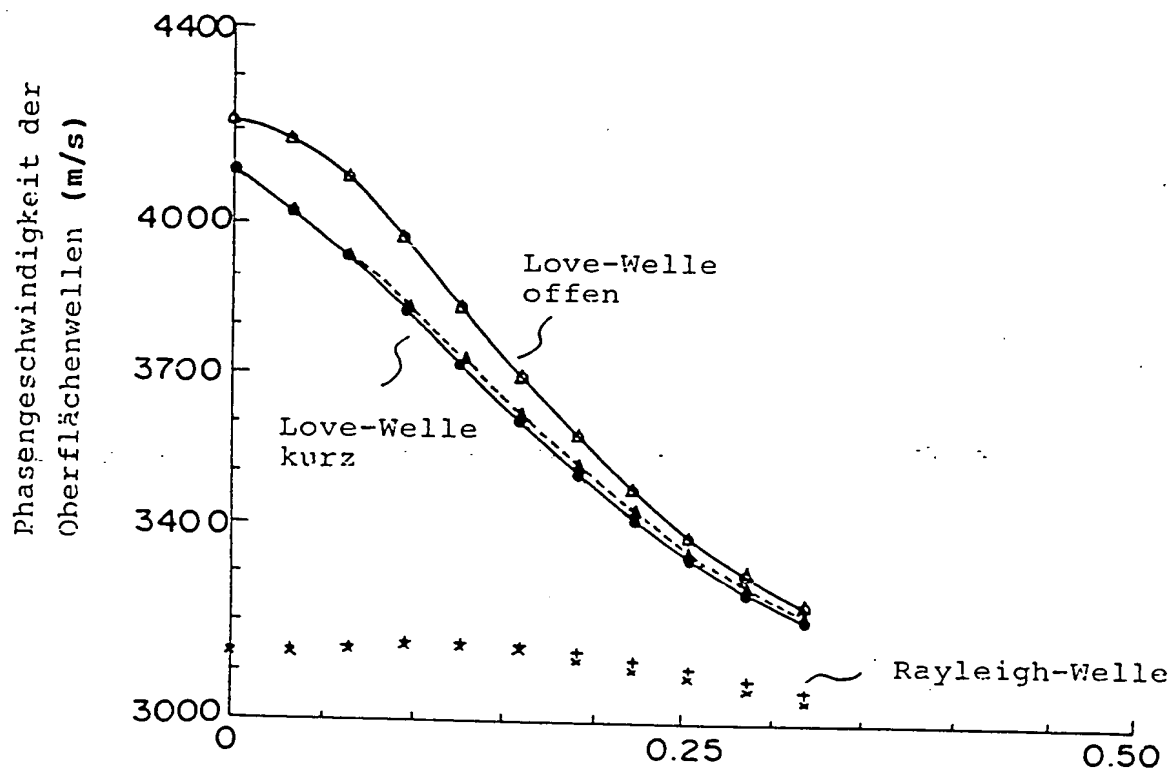
ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 12



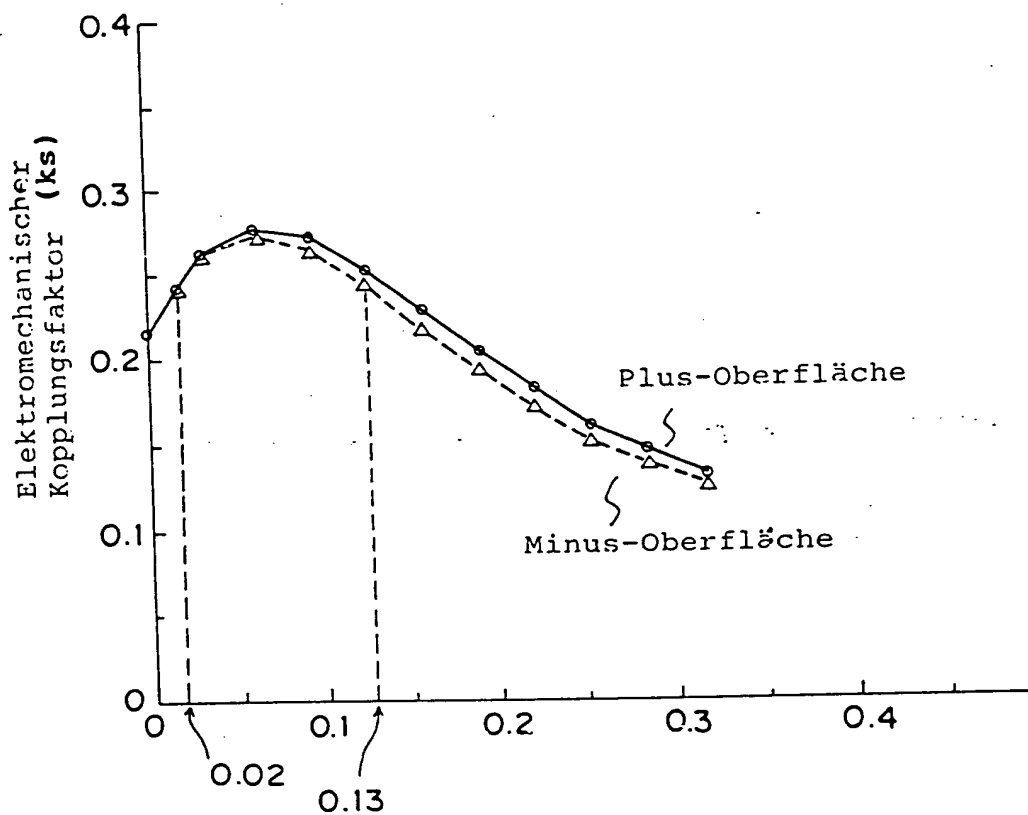
ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 13



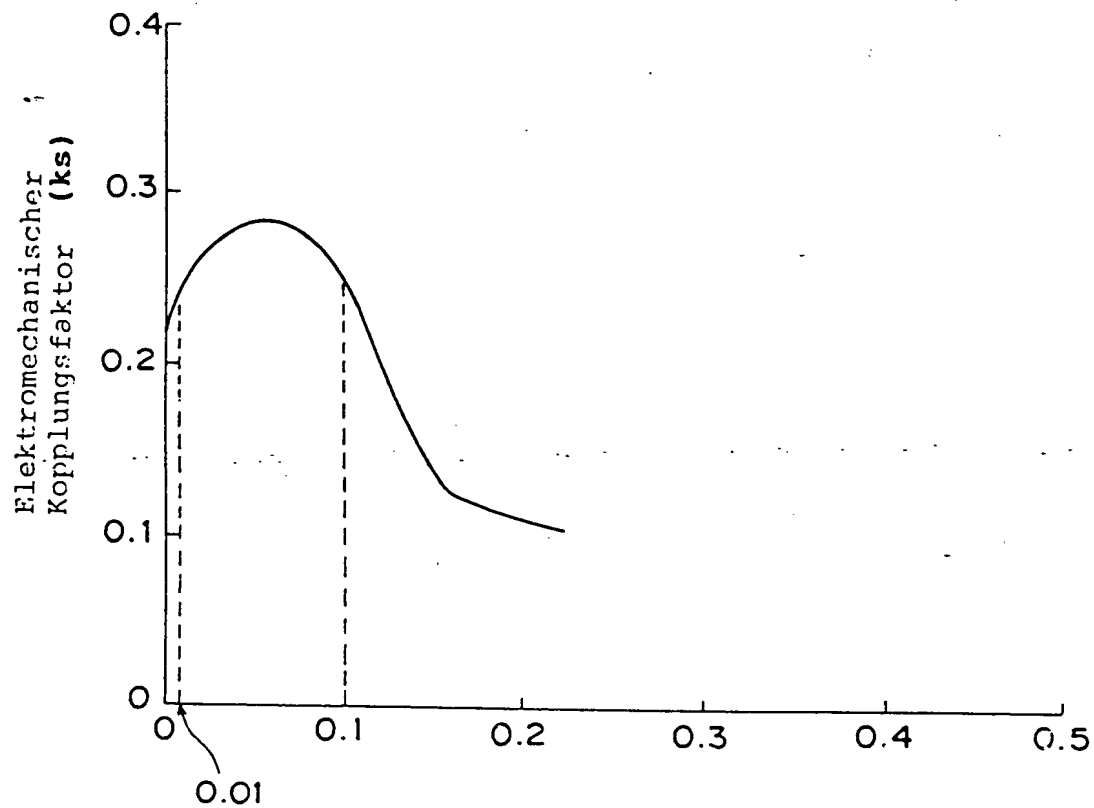
ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 14



ZnO-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 15



CdS-Filmdicke normiert
auf Wellenlänge (H/λ)

FIG. 16

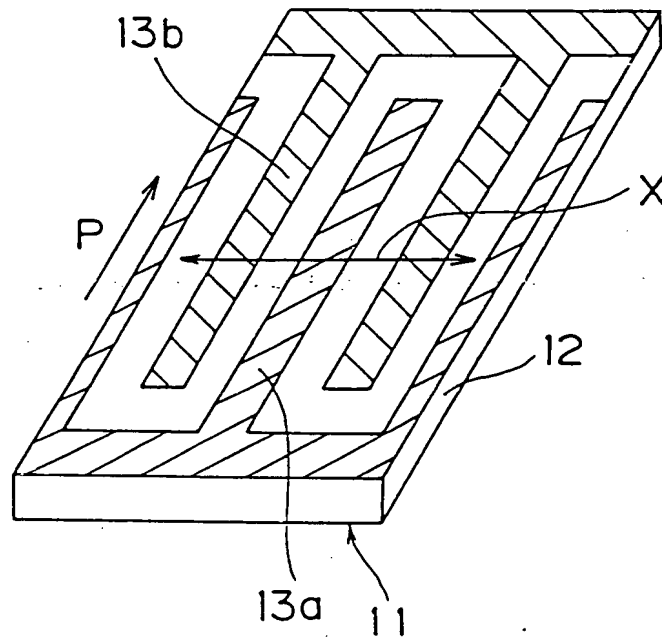


FIG. 1A

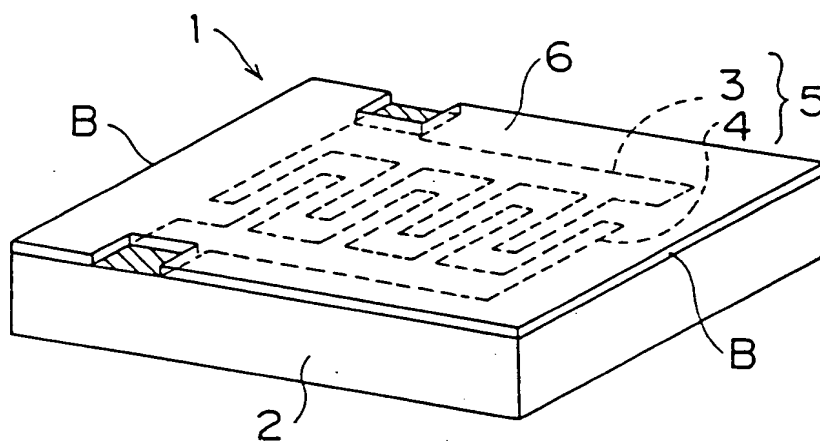


FIG. 1B

